

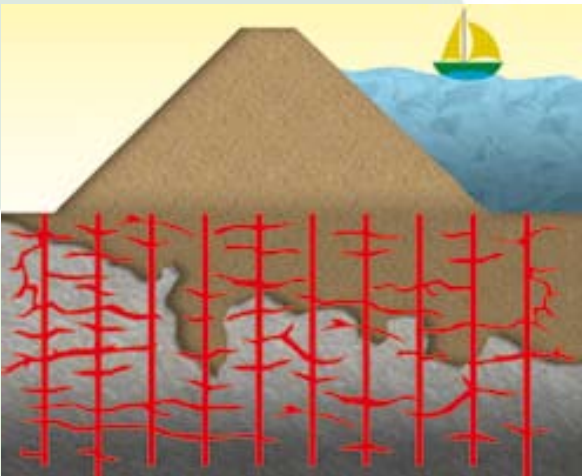
Indice

- 1 Definición**
- 2 Descripción básica del trabajo**
- 3 Materiales para inyección**
- 4 Equipamientos**
- 5 Trazo y preparación de lechadas**
- 6 Equipo de trabajo**
- 7 Tratamiento del suelo**
- 8 Evaluación**
- 9 Modelo de planilla de ejecución**

1 Definición

El objetivo del tratamiento de suelos y rocas por inyección es el de promover mejorías para situaciones especiales de la ingeniería civil, conforme los ejemplos a seguir:

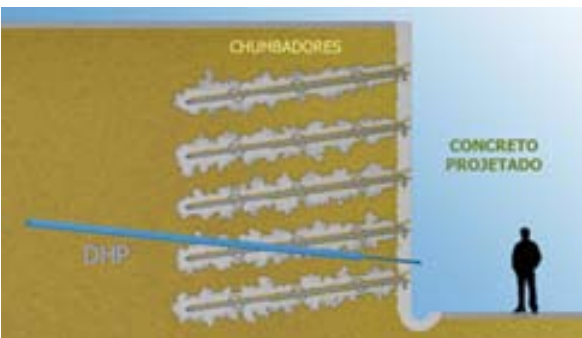
A) Aumentar su impermeabilidad (Figura 1)



B) Mejorar su capacidad de carga (Figura 2)



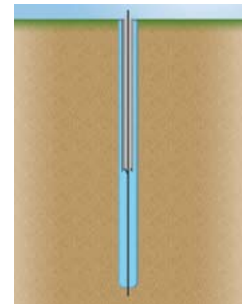
C) Mejorar sus condiciones de estabilidad (Figura 3)



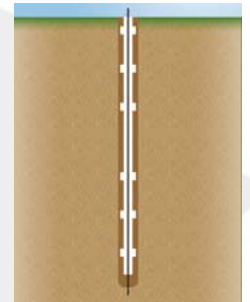
El tratamiento es hecho por la inyección de un determinado volúmen de material en el macizo, a una determinada presión. Esto material puede ocupar los vacíos existentes, romper el macizo y en el alojarse, provocando la densidad de las capas adyacentes, o impregnarse en sus vacíos.

El material inyectado puede ser mezcla de cemento, argamasa, suelo-cemento o compuestos químicos. Usualmente son inyectadas mezclas de cemento. Para facilitar la lectura, usamos siempre la expresión material inyectado. El procedimiento básico para la ejecución de los trabajos, envuelve los siguientes pasos:

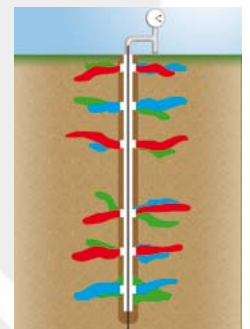
A) Ejecución de un hueco con diámetro mínimo de 3", que atraviesa la camada a ser tratada (Figura 4).



B) Colocación de un tubo de PVC rígido, con diámetro interno de 1" a 1,5", debidamente preparado con válvulas tipo manchete, espaciadas entre 30 y 100 cm. Inyección de material hasta rellenar totalmente el espacio del anillo entre el tubo de PVC y el hueco, que llamamos llenado del hueco (Figura 5).



C) Con el auxilio de un obturador doble, a partir de la válvula inferior, debe ser ejecutada la inyección, que irá promover el rompimiento del llenado del hueco y la introducción de un volúmen predeterminado de material en el suelo, en tantas fases cuantas fueran necesarias (Figura 6).



2 Descripción básica del trabajo

Los huecos son dispuestos en planta, según una distribución geométrica, que procura minimizar las interferencias con obstáculos existentes, bien como llegar a las áreas a ser tratadas. Para cada local, son definidas algunas etapas de inyección en los huecos. En general, la área inicial a ser tratada es grande y va siendo reducida en función de los resultados de presión y volúmen obtenidos en los huecos iniciales.

Para minimizar los costos, deben ser utilizados los menores diámetros de los huecos y del tubo de PVC, lo que garantiza una espesura mínima del llenado del hueco. Usualmente, los tubos de inyección tienen diámetro de 1/2" o 3/4".

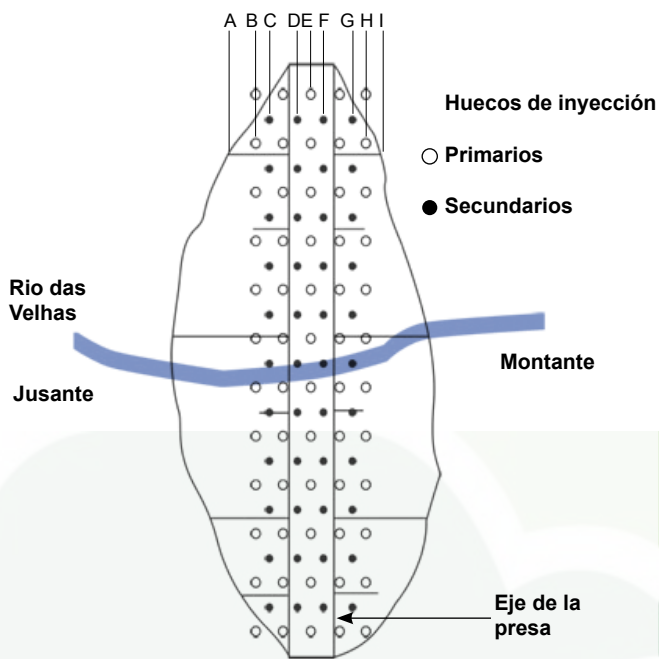


Figura 7 - Tratamiento de fundaciones de una presa.

La inyección a través del tubo será hecha después de que el llenado del hueco haya alcanzado una resistencia mínima, que impida su regreso a la superficie y, consecuentemente, el tratamiento del suelo adyacente. El tiempo de espera para fraguado y endurecimiento del llenado del hueco es de hasta 24 horas.

Los huecos serán inyectados en etapas, a través de los tubos, de acuerdo a la siguiente sistemática:

- El "Obturador Doble" debe ser posicionado en el nivel deseado, para aislar las válvulas de los niveles de encima y abajo. La ilustración (Figura 9) muestra la condición en que existe tubo con válvulas-manchete. En el caso de rocas, puede utilizarse obturador expansible, aislando cada trecho a ser tratado.
- El material debe ser inyectado con presión suficiente para romper el llenado del hueco.
- Durante la inyección del material, la presión debe ser tal que permita el flujo del material con el volumen especificado.

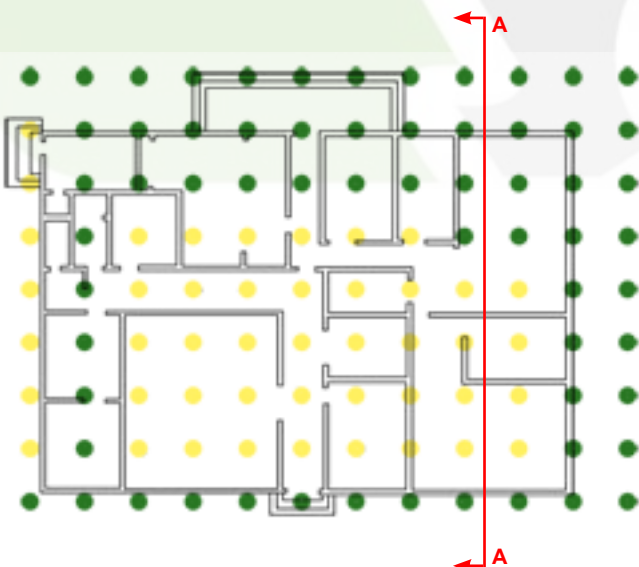


Figura 8 - Tratamiento de fundaciones de un edificio.

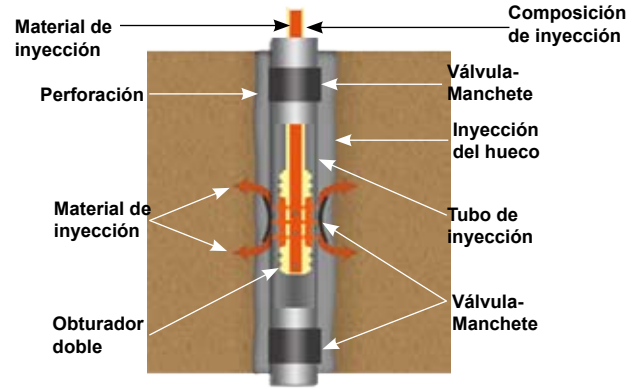


Figura 9 - Obturador doble.

- Después de la inyección de un cierto volumen de material (usualmente entre 20 y 100 litros), la inyección debe ser interrumpida, anotándose, para aquella válvula, los valores de la presión de abertura y de inyección.
- A continuación, el obturador debe ser posicionado en el nivel superior siguiente, repitiendo el ciclo para la inyección a este nivel.

Los detalles de proyecto en relación a los materiales, equipamientos, composición de las mezclas, presiones y volúmen de inyección, y control de calidad de los servicios, están definidos a seguir.

3 Materiales para inyección

Las mezclas normalmente usadas, tanto en la inyección en el suelo cuanto en el llenado del hueco, son formadas con cemento, suelo y agua.

Eventualmente, para mejorar sus características de estabilidad e inyección, esta mezcla puede recibir adición de bentonita. En general, los materiales que componen las lechadas, obedecen a los requisitos y exigencias técnicas, conforme sigue:

3.1 Agua

Debe presentarse visualmente limpia y exenta de cantidades perjudiciales de impurezas como gasóleo, ácido, álcalis, sales y materia orgánica de cualquier otra sustancia que interfiera con las reacciones de hidratación de los sólidos de la mezcla.

3.2 Cemento

El cemento debe ser del tipo Pórtland, presentar espesor "Blaine" no inferior a 3.200 cm²/g. Los locales de almacenamiento deben estar secos y ventilados, para retardar la hidratación. No es bueno apilar más de 10 sacos, y estas pilas deben estar apoyadas sobre un tablado de madera, para que el cemento no se ponga en contacto directo con el piso.

Cemento ya en proceso de hidratación no puede ser empleado en inyecciones.

3.3 Arcilla

Deben ser utilizados suelos arcillosos con tenor de arena inferior a 20% y exentos de materia orgánica con Límite de Liquidez (LL) mínimo de 50 y Límite de Plasticidad (LP) mínimo de 20. Materiales naturales con estas características son encontrados con facilidad.

Pueden ser usados también materiales arcillosos propios para la fabricación de tejas o ladrillos cerámicos. No

obstante, estos materiales, además de ser más caros, exigen un mayor tiempo de hidratación de la arcilla, pues esta arcilla es muy activa.

Antes de su utilización, los materiales arcillosos deben ser previamente mezclados con agua e hidratados por un período aproximado de 4 horas.

4 Equipamientos

4.1 Perforación

Los equipamientos de perforación a ser movilizados irán a depender del método escogido. Los huecos pueden ser ejecutados con abridores de broca o por equipamiento roto-percusivo o rotativo. En la ejecución del hueco puede existir la necesidad del uso de revestimiento.

Los equipamientos deben estar en perfecto estado de funcionamiento, y permitir la ejecución del hueco dentro de las especificaciones y de las condiciones impuestas por las limitaciones de las edificaciones existentes.

En algunos locales, para la ejecución del hueco, hay necesidad de atravesarse las lajas de los pisos de las edificaciones. En esto caso, es preciso usar herramientas adiamantadas o videos.

Tratándose de rocas o material rocoso, se puede optar o por el equipamiento de roto-percusión, que destruye el material excavado, o por lo rotativo, que lo recupera.

4.2 Inyección

Los equipamientos de inyección deben componer un circuito, conforme sigue:

- a) Demoledor de arcilla.
- b) Estanque de hidratación y homogenización de arcilla provisto de palas que mueven la lama constantemente. Se puede usar también estanques de menor capacidad,

intercomunicados, provistos de bomba que haga circular la lama entre ellos.

c) Mezclador de alta turbulencia, provisto de turbina inferior con rotación mínima de 1.700 rpm, capaz de preparar mezcla de cemento, suelo-cemento, en cantidad suficiente para suplir la bomba inyectora y suministrar la homogeneidad adecuada a la mezcla.

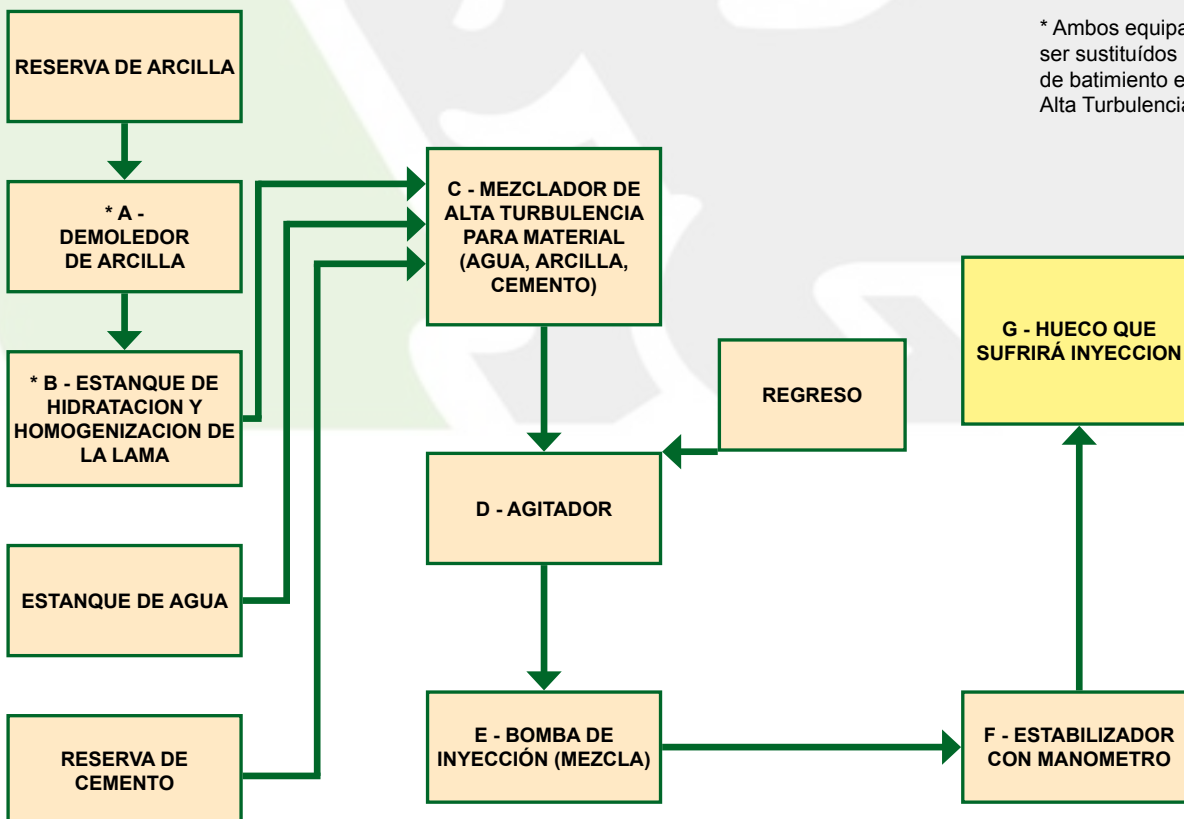
d) Agitador de lechada con capacidad igual al del mezclador, capaz de mantener la lechada en agitación. Entre el mezclador y el agitador es instalado un cernidor con 2 mm de abertura, que debe fácilmente ser removible para las constantes limpiezas.

e) Bomba de pistón triple marca Royal Bean, Boyles, Clivio, Sondap o similar, con capacidad de inyectar volúmenes de 50 litros/minuto a presiones de 50 Kg/cm² en huecos distantes por lo menos 50 metros de la central de inyección.

f) Estabilizador de presión capaz de reducir las oscilaciones manométricas. Deben ser instalados en los circuitos cuantos equipamientos fueran necesarios, hasta alcanzar la estabilidad. Manómetro de 4" provisto de dispositivo "salva-manómetro", con capacidad entre 10 y 100 Kg/cm².

g) Obturador doble con diámetros de 1" a 1,5", con espaciamiento de vedación en torno a 0,5 metro, del tipo expansivo o fijo, en cantidad suficiente para la inyección de varios huecos simultáneamente.

En el esquema propuesto, y alternativamente, se puede sustituir el demoledor de arcilla (A*) y el estanque de hidratación (B*) por un único equipamiento, que promueva la mezcla y la hidratación de la arcilla con agua. Se trata de un mezclador de alta turbulencia, similar a aquel utilizado en la mezcla final de la lechada.



* Ambos equipamientos pueden ser sustituidos por tiempo mayor de batimiento en el Mezclador de Alta Turbulencia.

Figura 10 - Diagrama de flujo de inyecciones.

5 Trazo y preparo de lechadas

5.1 Trazo

Usualmente es prevista la utilización de dos trazos básicos de mezcla de suelo, agua y cemento: uno para inyección en el suelo a ser tratado y otro para llenar el hueco.

La resistencia de la mezcla es rígida, principalmente por el factor agua/cemento (peso de agua/peso del cemento) de la misma. Para componer la lechada son adoptados los siguientes valores para peso específico de los granos de los sólidos: cemento $\gamma_c = 3,1$ Kg/litro, suelo $\gamma_s = 2,7$ Kg/litro.

Para la preparación de 1 m³ de lechada son necesarias las siguientes cantidades de componentes, según la fórmula:

$$\text{litros de lechada} = P_c/\gamma_c + P_s/\gamma_s + P_a/\gamma_a = P_c/3,1 + P_s/2,7 + P_a/1,0$$

donde: P_c = Peso del cemento (Kg); P_s = peso del suelo seco (Kg); P_a = peso del agua (Kg).

En la tabla a seguir, tenemos el ejemplo de dos trazos usuales de suelo-cemento. Los trazos predefinidos son ajustados durante la fase de ensayos iniciales, llevándose en cuenta, principalmente, las características de la arcilla a ser utilizada y permitiendo el encuadramiento con las siguientes características:

- Factor de sedimentación hasta 5%
- Tiempo de deslizamiento

TIPO DE EMBUDO	TIEMPO (segundos)	
Marsh Ø 5,0 mm	36 a 40	
Mecdsol Ø 10 mm	9 a 14	
MATERIAL	TRAZO 1	TRAZO 2
Cemento (Kg)	100	160
Suelo (Kg)	340	340
Agua (l)	840	820
Densidad de la mezcla (Kg/litro)	1,28	1,32

Figura 11 - Trazos usuales de suelo-cemento.

Durante los trabajos, los materiales de inyección deben ser controlados a partir de las siguientes medidas previamente obtenidas en laboratorio: densidad, factor de sedimentación y tiempo de deslizamiento.

La densidad define el trazo. El factor de sedimentación, define la estabilidad. El tiempo de deslizamiento define la fluidez (capacidad de inyección). El control del trazo se hace por la medida de la densidad de la mezcla: suelo + agua, y de la mezcla final: cemento + agua + suelo.

5.2 Preparación de las lechadas

Las lechadas son preparadas a través de la agitación turbulenta de la arcilla hidratada con el cemento y el agua, hasta alcanzar la perfecta homogenización de la mezcla.

En las dosis de los trazos deben ser consideradas las cantidades de agua empleadas en la hidratación de la arcilla.

Antes de iniciarse los trabajos de inyección y después de definir el tipo de arcilla a ser usada en el tratamiento, deben ser hechos una serie de ensayos con varias mezclas, hasta definirse el trazo usado.

Cuando es preciso la inyección rápida de las fases, el llenado del hueco es compuesto por trazo rico en cemento, que usualmente es una lechada con factor $a/c = 0,5$ (en peso).

6 Equipo de trabajo

6.1 Encargado general de servicios

a) Verifica las condiciones para la entrada y movimientos de los equipamientos a pie de obra; la descarga de los equipamientos, utensilios y herramientas; la instalación de la central de inyección y la implantación general de la obra.

b) Verifica la programación de ejecución (secuencia ejecutiva) de acuerdo con las características de la obra y necesidades del cliente.

c) Coordina el diálogo diario de seguridad antes del inicio de las actividades de cada día e instruye en relación a la seguridad durante la ejecución de los servicios.

d) Coordina la ubicación, verticalidad e instalación del equipamiento de perforación, mezclador y bomba de inyección del material.

e) orienta en relación a los procedimientos de perforación, instalación del tubo de inyección e inspección.

6.2 Operador de máquina de perforación

a) Mueve el equipamiento de acuerdo con la secuencia ejecutiva.

b) Instala el equipamiento en el hueco, observando la ubicación e inclinación.

c) Verifica la cantidad y tamaño de los tubos de revestimiento colocados para acompañar la profundidad perforada.

d) Detecta las mudadas en las capas del suelo en la medida en que la perforación avanza.

e) Detecta eventuales pérdidas de agua durante la perforación.

f) Elabora el registro de los datos de perforación para incluirlos en la planilla.

g) Orienta a los auxiliares de perforación en cuanto a la utilización de herramientas se refiere.

h) instala el tubo de inyección en el hueco.

6.3 Inyector

a) Prepara el material a ser inyectado.

b) Coordina la inyección, tanto en la posición del obturador como en la inyección, de forma tal que puede atender las condiciones del proyecto y lavado del tubo (después de la inyección) en que fue usada la válvula-manchete.

c) Registra en las planillas los valores de presión y volumen inyectado.

6.4 Auxiliar general

Auxilia a los especialistas en las actividades principales.

*Debido a que las tareas no se realizan simultáneamente, un mismo funcionario puede ejercer varias funciones, siempre y cuando él esté calificado para realizarlas.

7 El tratamiento del suelo

7.1 Inyección en el hueco

Después de la instalación del tubo de PVC, es hecha la inyección en el hueco, o sea, el relleno del espacio del anillo entre el tubo de PVC y el hueco. Esta actividad es ejecutada con la inyección a través de la válvula-manchete inferior.

Esto trabajo es hecho de forma lenta y será considerado concluido cuando el material inyectado aparezca en la boca del hueco. Después del llenado del hueco, el tubo de PVC es lavado con circulación de agua.

En los casos en que existe piso, si fuera constatado que el material está penetrando entre el piso y el atero, la inyección en el hueco debe proseguir hasta que el vacío bajo el piso haya sido llenado. Alternativamente, puede llenarse el hueco e, a seguir, introducir el tubo de PVC.

Durante la inyección del hueco, puede ocurrir un consumo excesivo de material, caracterizando que el tubo atravesó una cavidad, tubos, cajas etc. En esto caso, los trabajos deben ser interrumpidos para que se verifique qué sucedió.

Para que ocurra la inyección en el suelo, el llenado del hueco precisa tener una resistencia mínima, para que el material de inyección promueva el rompimiento localizado, lo que posibilita su penetración en el interior del macizo, sin deslizarse al contacto del hueco con el suelo circundante o por el contacto del hueco con el tubo.

Por otro lado, un llenado del hueco excesivamente resistente exige altas presiones para su rompimiento y para la abertura de la válvula. El llenado del hueco más adecuado depende de su espesor, del trazo del material y del tiempo de fraguado y endurecimiento de la lechada. El trazo del material y el tiempo de rompimiento del llenado del hueco son ajustados en el campo.

7.2 Inyección en el suelo

Las inyecciones son ejecutadas en una única, o en varias fases.

Para evitarse la inyección de material a grandes distancias y para minimizar los riesgos de fracturas en los pisos de las edificaciones, el volúmen a ser inyectado por manchete debe ser, inicialmente, limitado.

La sistemática a ser adoptada en la inyección consiste en imponerse un volúmen constante de inyección, verificando el comportamiento de las presiones de respuesta del suelo.

En función de las presiones observadas, son tomadas las decisiones de proseguir o interrumpir las inyecciones.

En los criterios de interrupción de las inyecciones son llevadas en cuenta las observaciones relativas al surgimiento de material en la superficie o eventuales riesgos de comprometimiento de las estructuras vecinas.

Los volúmenes y presiones de inyección, inicialmente especificados, son ajustados durante la ejecución de los servicios.

7.3 Abertura de la válvula-manchete

Después de la inyección del llenado del hueco, son

iniciadas las inyecciones individuales de cada válvula-manchete, usualmente, de abajo para arriba.

El primer paso es la aplicación de presiones crecientes hasta la abertura de la válvula-manchete, percibida por la queda brusca del valor de la presión registrada en el manómetro y la inmediata absorción del material. En caso que no se consiga abrir la manchete utilizándose el material, su abertura puede ser provocada por la inyección de agua.

La presión máxima utilizada para la abertura de la válvula-manchete debe ser registrada en planilla propia.

7.4 Presión de inyección

Las presiones de inyección son determinadas por el estado de confinamiento del suelo.

En un proceso de inyección con volúmen constante ocurre, en la mayoría de las veces, un comportamiento de presiones semejantes al mostrado en el gráfico que sigue a continuación, de donde se puede resaltar:

Pa Presión máxima de abertura de la válvula

Pi Presión inicial de inyección

Pf Presión final de inyección

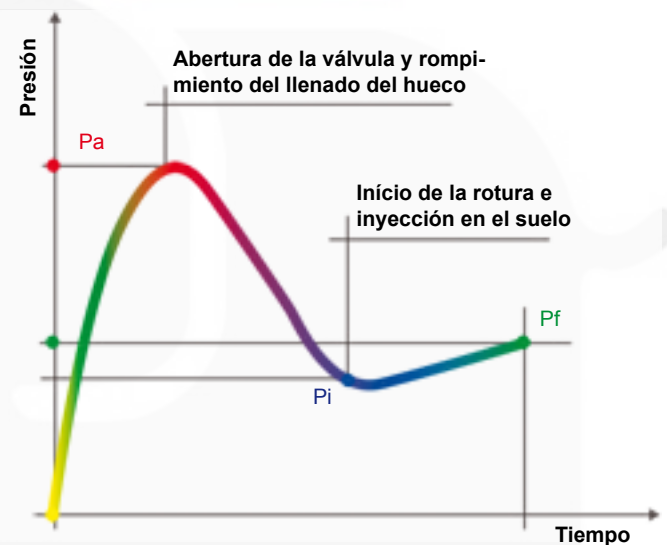


Figura 12 - Comportamiento típico de las presiones durante la inyección en el suelo.

- Después de la abertura de la válvula y rompimiento del llenado del hueco (P_a), se observa una queda brusca de la presión (P_i), caracterizando el inicio de la inyección en el suelo.

- A medida que la inyección prosigue, nuevos trechos del suelo pueden ser rotos y rellenos con material, teniendo como consecuencia, un aumento lento y progresivo de la presión. Algunas veces es común observar un ligero aumento brusco de presión, volviendo enseguida, a aumentar lentamente. Esto es explicado de la siguiente forma: el aumento repentino de la presión promueve la rotura de más un trecho del suelo que, enseguida, pasa a ser llenado con material de inyección.

- Si en determinado momento, la presión de inyección queda estabilizada o hasta disminuye, puede ser que el plano de rotura haya interceptado un vacío que está siendo llenado con material de inyección. Después de esta cavidad ser llenada, la presión probablemente volverá a subir, caracterizando su llenado.

7.5 Control de registros

En la fase inicial de definición de los trazos de los materiales y durante la ejecución de los trabajos de inyección, es realizada una serie de controles, permitiendo determinar las características de los materiales. Básicamente, estos controles son: control visual (continuo); densidad (diario) y para cada trazo preparado; y tiempo de deslizamiento (diario).

Durante la ejecución de los huecos, todas las informaciones juzgadas de interés deben ser registradas,

tales como la presencia de vacíos, niveles de agua, pérdida de agua etc.

En la instalación del tubo, deben ser registrados el posicionamiento y los espacios de las válvulas, tomándose como referencia el nivel de la boca del hueco, lo que permite el correcto posicionamiento del obturador doble durante las inyecciones.

En la inyección del llenado del hueco deben ser registrados, principalmente, el trazo utilizado, volúmenes y pérdidas de material, si hubiese.

Durante las inyecciones en el suelo, además de los volúmenes inyectados por las válvulas, deben ser registradas la presión de apertura de la válvula (Pa) y la presión final de inyección (Pf).

Para cada hueco, debe ser elaborada una planilla conteniendo todos los datos, desde la apertura de los huecos hasta la inyección.

7.6 Criterios para la interrupción

El criterio para interrumpir la inyección es definido con base en el análisis de todos los datos observados durante los trabajos, específicamente para cada caso de obra.

7.7 Equipamientos de ensayos del material

Para ejecutarse los ensayos de los materiales de inyección se debe instalar un pequeño laboratorio de campo, equipado con:

- Densímetros con graduación que permitan lectura de variación de densidad de 0,01 g/cm³.
- Embudo Marsh con salida de 5 cm de largo y diámetro de 5 mm.

8 Evaluación

El tratamiento de suelos por inyección de consolidación es un método muy eficiente, aunque, intuitivo e interactivo.

La eficiencia va a depender de la intensa interacción entre los equipos de proyecto y ejecución. Ensayos de pérdida de agua anteriores y posteriores al trabajo, bien como medidores de nivel de agua, pueden apreciar y comparar el resultado obtenido y deben ser obligatoriamente utilizados.

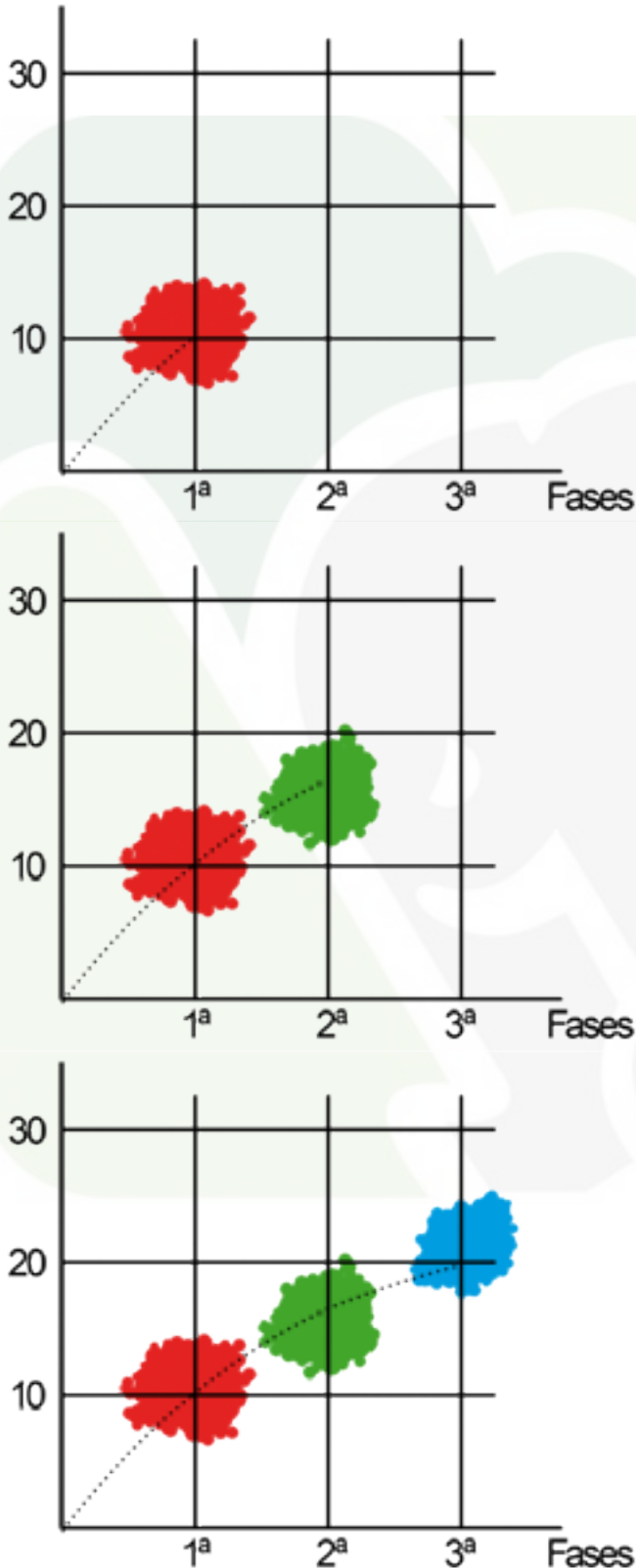


Figura 13 - Comportamiento típico de las presiones durante la inyección de las fases

9 Planilla de inyección

PLANILLA DE INYECCION															
OBRA N°		CLIENTE				LOCAL									
1. DATOS DEL HUECO				2. DATOS DE LA PERFORACION											
LARGOS				MATERIAL			LARGO			DIAMETRO					
TOTAL		m		SUELO											
LIBRE		m		ROCA ALTERADA											
CON VALVULAS		m		ROCA SANA											
HUECO N°				PERDIDA DE AGUA				REVESTIMIENTO							
				() SI () NO				() SI () NO		() SI () NO					
3. DATOS DE LA INYECCION															
HUECO		HI		HT		FECHA		/		/		FACTOR A/C		VOLUMEN	
VALVULA NUMERO	1ª FASE			2ª FASE			3ª FASE			4ª FASE			PRESION MAXIMA DE INYECCION (Kg/cm²)	VOLUMEN TOTAL	
	HI	HT	A/C	HI	HT	A/C	HI	HT	A/C	HI	HT	A/C			
	PA	PI	V	PA	PI	V	PA	PI	V	PA	PI	V			
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
TOTALES															

PA- PRESION DE ABERTURA HT - HORA DEL TERMINO (HORA:MIN) NI - VALVULA NO INYECTADA V - VOLUMEN DE MATERIAL
 PI - PRESION DE INYECCION (Kg/cm²) HI - HORA DEL INICIO (HORA:MIN) NA - VALVULA NO ABRIO (SACOS)

4. TOTALES - RESUMEN			5. FIRMAS	
FASE	VOLUMEN	SACOS	_____ CLIENTE _____ SOLOTRAT	
HUECO				
VALVULAS				
TOTAL				

6. OBSERVACIONES GENERALES

Figura 14 - Modelo de planilla de inyección.